北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析

杨元喜^{1*}, 许扬胤^{2†}, 李金龙³, 杨诚⁴

1. 地理空间信息工程国家重点实验室, 西安 710054;

2. 信息工程大学地理空间信息学院, 郑州 450001;

3. 北京卫星导航中心, 北京 100094;

4. 中国地质大学(北京)土地科学技术院, 北京 100083

* 通讯作者, E-mail: yuanxi_yang@163.com

† 同等贡献, E-mail: xu_yangyin@163.com

收稿日期: 2017-12-11; 收修改稿日期: 2018-02-23; 接受日期: 2018-03-08; 网络发表日期: 2018-04-03

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFB0501700, 2016YFB0501701)和国家自然科学基金项目(批准号: 41374019)资助

摘要 2017年11月5日第一和第二颗北斗三号系统卫星发射升空, 开启了中国北斗全球系统组网建设工程. 为了验证北斗全球卫星导航系统的信号载荷和设计性能, 2015至2016年间先后发射了五颗北斗三号试验卫星, 较全面验证了北斗三号系统的性能. 文章侧重描述北斗三号试验系统卫星钟、星间测距、时间同步和卫星定轨性能; 详细分析了北斗三号民用信号的信噪比、伪距误差随高度角变化、多路径误差、空间信号综合质量、授时精度等; 并与北斗二号系统相关性能进行了比较; 最后基于现有试验卫星信号性能, 预测了未来北斗全球系统的定位、导航和授时(PNT)性能.

关键词 北斗三号, 试验卫星, 信号, 授时, 信噪比

1 引言

北斗卫星导航系统按照“三步走”战略发展, 已顺利完成北斗实验验证系统, 简称北斗一号系统(BDS-1)(1990~2003年)和北斗区域卫星导航系统, 简称北斗二号系统(BDS-2)(2003~2012), 现正在建设北斗全球卫星导航系统, 简称北斗三号系统(BDS-3)(2016~).

BDS-1于2003年投入服务, 为用户提供定位、授时和短报文通信服务(杨元喜, 2010; 杨元喜等, 2011).

由于北斗一号由两颗地球静止轨道卫星(Geostationary Earth Orbit, GEO)组成, 采用透明转发体制, 用户观测两颗卫星的距离一般不能获得三维坐标, 于是需要北斗运控中心从高程数据库中获得用户高程, 再计算用户的三维坐标, 将结果发送给用户. 显然, 用户与计算中心必须建立数据通道, 进而实现用户的位置跟踪, 同样用户与中心的数据通道也为实现用户间的短报文通信功能提供了基础(谭述森, 2010; 谷军霞等, 2015). 用户定位精度约为20m, 授时精度: 100ns(单向)和20ns

中文引用格式: 杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 杨诚. 2018. 北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析. 中国科学: 地球科学, 48: 584–594, doi: [10.1360/N072017-00434](https://doi.org/10.1360/N072017-00434)

英文引用格式: Yang Y, Xu Y, Li J, Yang C. 2018. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: Data analysis based on BDS-3 demonstration system. Science China Earth Sciences, 61: 614–624, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9186-9>

(双向), 并具有120汉字的短报文通信能力, 但是不具备动态定位能力.

BDS-2于2012年投入运行(杨元喜等, 2014), 由五颗地球静止轨道卫星(GEO)、五颗倾斜同步轨道卫星(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)和四颗中圆轨道卫星(Medium Earth Orbit, MEO)组成, 服务范围覆盖55°N~55°S, 东经55°~180°, 在亚太地区的覆盖率约为94.6%. BDS-2延续了BDS-1的定位、授时和短报文通信功能, 定位和授时精度均比BDS-1有显著提升. BDS-2全星座播发三个频点信号B1、B2和B3, 三频信号可以提供更多具有优良特性的组合观测量(李金龙等, 2012; Li J L等, 2017), 有利于整周模糊度的快速确定(Feng, 2008; Geng和Bock, 2014; Li J L等, 2013)和长距离RTK解算(Li B F等, 2017), 同时多频信号也可提高定位解算的精度和可靠性(Li B F等, 2013).

自BDS-2系统提供服务以来, 其测量精度、轨道与钟差性能、授时精度和定位精度等性能指标均已得到了充分的验证. BDS-2的B1频点码与载波相位测量精度分别为11cm和0.5mm, B2频点码与载波相位精度分别为5cm和0.3mm, B1频点信号单频导航精度: 水平分量约为6m, 高程分量约为10m(杨元喜等, 2014). BDS-2卫星轨道研究也取得重要进展(He等, 2013; 施闯等, 2012), 正常情况下, IGSO和MEO卫星的广播星历轨道的径向精度好于0.5m; GEO卫星的广播星历轨道径向精度好于1.0m; 而IGSO和MEO卫星的精密星历轨道径向精度好于10.0cm, GEO卫星的精密星历轨道径向精度约为50.0cm左右(彭汉兵等, 2016; 施闯等, 2012). 若卫星处于星蚀期内(尤其是偏航机动期间), IGSO和MEO卫星的广播星历和精密星历轨道精度均出现下降趋势; 广播星历轨道径向误差达1.5~2.0m, 精密星历轨道径向误差可能超过10.0cm(彭汉兵等, 2016). 各分析中心BDS-2 GEO、IGSO和MEO卫星精密钟差的差异分别在0.5~0.8、0.2~0.3和0.15~0.2ns(Guo等, 2016), BDS-2星载铷原子钟的一秒稳定度为 $7 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-11}$ 、千秒稳定度约为 1×10^{-13} 、天稳定度约为 $2.53 \times 10^{-14} \sim 9.38 \times 10^{-14}$ (Han等, 2013), 授时精度分为单向授时和双向授时两种, 精度分别为50ns和10ns(Han等, 2011). 不同模式下的BDS-2定位精度也已经有不少学者做了详细分析(Shi等, 2013; He等, 2014; Li J L等, 2017).

北斗全球系统(BDS-3)2016年开始建设, BDS-3星

座将由三颗GEO卫星、三颗IGSO卫星和24颗MEO卫星组成. 三颗GEO卫星位于东经80°、110.5°和140°, 三颗IGSO卫星的倾角为55°, 24颗MEO卫星平均分配于三个轨道面上, 轨道高度21528km, 倾角55°(China Satellite Navigation Office, 2017a). 预计2020年建成并投入使用.

2017年11月5日BDS-3组网卫星第一号和第二号卫星发射升空(编号19和20), 标志着中国北斗全球卫星导航系统正式步入组网阶段. 为了全面验证BDS-3系统的设计及可能实现的目标, 从2015年开始, 我国先后发射了5颗BDS-3试验卫星, 包括两颗IGSO卫星I1-S和I2-S, 以及三颗MEO卫星M1-S、M2-S和M3-S. 试验卫星播发四个频点信号B1(1575.420MHz)、B2(1191.795MHz)、B3(1268.520MHz)和Bs(2492.028MHz), 卫星间建立了Ka星间链路, 卫星上搭载了新的星载氢钟, 测试了各类技术体制的设计状态和卫星与运控间的协同状态, 开展了星间链路的综合验证, 并进行了上行注入与下行接收验证及下行信号质量监测评估, 同时也对BDS-3时间体制, 精密定轨体制, 系统定位、测速和授时(PVT)指标进行了验证评估, 较全面测试和验证了未来北斗全球系统的PNT性能.

2 北斗试验系统基本性能

BDS-3系统不仅在卫星星座方面比BDS-2系统有大幅改进, 在其他方面也做了较大调整. 在卫星载荷方面, BDS-3试验卫星上增加了新的氢原子钟、Ka星间链路以及用于发播S频段信号的卫星天线等; 在信号设计方面, BDS-3系统相比于BDS-2也有很大改进, 见表1. 全球系统信号与GPS、Galileo、QZSS和INSS系统间重叠信号增多, 将有利于各GNSS系统间的兼容与互操作, 同时新增的S频段Bs信号将作为未来重要的频率资源(谭述森, 2017). 此外, 为了实现BDS-2到BDS-3的平稳过渡, 试验卫星上也同时播发BDS-2的B1I和B3I/Q信号, 其中试验卫星I1-S仅播发BDS-2的B1I、B3I/Q信号, 试验卫星I2-S、M1-S和M2-S同时播发BDS-3信号和BDS-2的B1I、B3I/Q信号, Bs频点信号仅在I2-S和M1-S卫星上播发, 试验卫星M3-S仅用于在轨测试, 并未正式投入使用.

BDS-3试验卫星的星载铷原子钟天稳定度E-14量级, 氢原子钟天稳为E-15量级, 与BDS-2星载原子钟相

表 1 BDS-3与其他卫星信号的比较

Band	频率(MHz)	GPS	Galileo	BDS-2	QZSS	IRNSS	BDS-3 Test System
S	2492.028					Bs	Bs
L	1575.420	L1	E1		L1		B1
	1561.098			B1			
	1278.750		E6				
	1268.520			B3			B3
	1227.600	L2			L2		
	1207.140		E5b	B2			B2b
	1191.795		E5				B2a+b
	1176.450	L5	E5a		L5	L5	B2a

比提高了一个量级; 星地、星间和站间时间同步精度约为0.14ns, 卫星钟差2小时预报精度约为0.4ns, 显著优于BDS-2的结果(China Satellite Navigation Office, 2017b).

星地观测数据多星定轨三维位置精度优于1.5m, 预报2小时用户距离精度约为0.5m, 星地/星间联合定轨精度1m, 预报2小时空间信号精度0.31m, 优于仅星地观测定轨精度(陈金平等, 2016; 唐成盼等, 2017). 星地/星间链路观测数据组合定轨, 轨道T方向精度大幅提升, 定轨精度提升63.1%, 轨道预报精度提升75.7%(由于增加卫星T、N方向观测约束). 星地/星间联合钟差预报精度: IGSO由0.4ns提高至0.3ns, MEO由1.1ns提高至0.5ns; 比仅采用星地观测预报精度提升了53.9%. 如果利用北斗运控中心L波段测定的数米量级的卫星星历作为先验信息, 再利用Ka星间链路进行自主定轨, 则可实现好于6m的定轨精度(Ren等, 2017).

BDS-3监测接收机测距误差最低0.04ns, 多频终端测距精度0.1~0.4m, 测速精度0.03m/s(95%), 试验卫星与BDS-2卫星B1I/B3I单频联合定位水平精度约为3.5~4.3m, 高程精度约为3.8~5.9m(China Satellite Navigation Office, 2017b).

3 用户监测性能分析

为了较全面验证未来北斗全球系统可能达到的性能, 我们侧重从用户角度分析和预测北斗全球系统可能达到的性能.

3.1 信噪比分析

卫星信号的信噪比可用来衡量测距信号质量的优劣, 并间接反映载波相位的测距精度(张小红和丁乐乐, 2013). 本文首先分析了试验卫星各频点信号信噪比随高度角变化情况. 实验中, 采用在郑州地区采集的实测数据进行分析, 数据采集设备为成都国星公司生产的全球系统多频接收机终端, 数据采集于2017年10月20日到26日, 采样间隔为30s, 截止高度角取为10°(下文中伪距噪声分析及伪距多径分析均采用此组数据). 将各导航信号信噪比按卫星高度角2°间隔分段取均值, 图1展示了I2-S和M1-S卫星B1C、B1I、B2b、B2a+b、B3I和Bs信号的信噪比随高度角变化情况(B2a信号由于接收机原因未能参与统计).

分析图1可得, 各频点信号的信噪比与高度角相关趋势几乎相同, 即卫星相对于用户高度角越高, 信号的落地信噪比越高, 低仰角卫星信噪比较低; 相同高度角条件下, MEO卫星信噪比要比IGSO卫星高2~3dB, 原因可能为IGSO卫星轨道高度更高, 卫星发射功率偏低所致. Bs频点(红色曲线)信噪比变化略显异常, 且在IGSO卫星和MEO卫星上的性能略有不同. I2-S卫星的Bs频点信噪比随高度角变化跨度大, 低仰角时小于其他信号信噪比, 但当高度角增大时, 信噪比显著提升, 当高度角大于70°后, Bs信号的信噪比相对于其他信号略高; 在M1-S卫星上, Bs频点信噪比与其他频点相比明显偏低, 经核实为M1-S卫星Bs频点信号发射功率偏低所致.

3.2 伪距噪声分析

伪距噪声是绝大多数用户最关心的基本性能, 因为大多数用户只用廉价的单频导航接收机。

本文采用单频伪距相位差组合(code minus phase combination, CC)作历元间差分来对各导航信号伪距噪声进行分析(de Bakker等, 2009)。CC组合作历元间差分可消去载波相位模糊度并减弱随时间变化缓慢的电离层延迟、硬件延迟及多径效应等误差影响, 残余量主要受伪距噪声影响。实验中计算得到各导航信号CC组合历元差时间序列, 并按卫星高度角 10° 间隔统计其相对于零均值的均方根误差(Root Mean Square Errors, 简称RMS), 最后换算得到各导航信号非差伪距噪声RMS。BDS-3的两类卫星各频点信号的伪距噪声均随高度角变化而变化, 图2给出了I2-S和M1-S卫星各频点信号非差伪距噪声随高度角的变化情况, I1-S和M2-S卫星结果分别与I2-S和M1-S卫星相似, 故不

再给出。

从图2我们不难发现:

(1) 各频点伪距噪声均随高度角增大而减小, 且当高度角大于 50° 时趋于稳定。

(2) 在相同高度角条件下, B1C信号伪距噪声RMS明显高于其他信号, B2a+b信号伪距噪声RMS明显低于其他信号。

(3) 如果将两类卫星(IGSO和MEO)相同信号的伪距误差再进行比较, 我们发现, 同一信号伪距测量精度在同类卫星间基本一致, 即IGSO卫星同一类信号伪距测量精度相当, MEO卫星的伪距测量精度也基本相同。

(4) MEO卫星伪距噪声RMS比IGSO卫星的伪距噪声RMS略大, 分析原因可能为观测弧段内MEO卫星低仰角观测比例多于IGSO卫星。

(5) 如果再将各频率信号作细致比较, 可以发现,

图1 BDS-3信号信噪比随高度角变化情况

图2 BDS-3信号伪距噪声随高度角变化情况

在各导航信号中, B1C信号伪距测量精度最差, B2a+b信号伪距测量精度最高, Bs频点伪距测量精度较差, 但优于B1C频点。

3.3 伪距多径误差分析

伪距多径误差直接影响卫星轨道测定和用户导航定位精度。现有研究指出BDS-2三频信号伪距多径中均存在与高度角相关的系统性误差(Wanninger和Beer, 2015), 该误差可能由卫星端多径误差引起, 将会对北斗导航定位的性能产生影响。本文采用伪距多径(Multipath combination, MP) 组合(de Bakker等, 2009; Wanninger和Beer, 2015)对BDS-3试验卫星各导航信号伪距多径误差进行分析。图3给出了I2-S和M1-S卫星全球系统新信号的伪距多径时间序列及高度角时间序列(蓝色代表多径误差, 红色代表卫星高度角, 黑线为零值), 图4给出了I1-S、I2-S、M1-S和M2-S四颗卫星各频点信号伪距多径RMS的统计情况。

从图3和图4可以看出:

(1) BDS-3全球系统信号的伪距多径效应明显减弱, 基本没有显著随高度角变化的系统误差。

(2) 各导航信号中, B2a+b信号抗多径能力最强, B1C信号抗多径性能最差。

(3) S频点伪距多径在IGSO和MEO卫星均呈现系统误差, 见图3, 全球系统其他频点信号中未见明显类似系统误差, 可能是由于S频点的天线与L频点的天线不一致引起。

(4) MEO卫星伪距多径RMS统计值要大于IGSO卫星, 我们认为, 部分原因是由于MEO卫星观测时段的低仰角观测比例较大。

为了将BDS-3与BDS-2信号伪距多径误差进行比较, 本文分别计算了BDS-2和BDS-3星座的MEO卫星和IGSO卫星的相同信号B1I和B3I的伪距多径误差, MEO卫星伪距多径误差时间序列对比见图5; IGSO卫星伪距多径误差时间序列对比见图6; 图7给出了BDS-2和BDS-3所有MEO和IGSO卫星的B1I和B3I的伪距多径RMS统计结果。

从图5、图6和图7可明显看出:

(1) BDS-3试验卫星B1I和B3I信号伪距多径小于BDS-2同类卫星, BDS-2卫星伪距多径中存在与高度角相关的系统性偏差, 导致其RMS统计结果较差, 而BDS-3试验卫星B1I和B3I卫星伪距多径中未见明显系

统性偏差。

(2) 比较图7中的BDS-2的C06~C10与C11~C14以及BDS-3的 I1-S和I2-S与M1-S和M2-S, 均可发现, IGSO卫星(BDS-2: C06~C10; BDS-3: I1-S和I2-S)的多径效应明显小于MEO卫星。

(3) B3I信号多径略小于B1I多径影响, 所以, 在BDS-3的ICD文件中建议用户使用B3I作为频率偏差参考基准。

3.4 空间信号质量及授时精度

用户等效距离误差(User Equivalent Range Error, UERE)常用来表征空间信号质量, 其大小可反映GNSS伪距单点定位精度(Montenbruck等, 2015)。一般UERE计算公式为

$$\begin{aligned} \text{UERE}_{r,j}^s &= p_{r,j}^s - (\bar{p}_r^s - \bar{dt}_{\text{eph}}^s + \text{TGD}_j^s + r_{r,j}^s + \bar{v}_r^s) \\ &= dt_{r,j}^s + \Delta\rho_r^s - \Delta dt_{\text{eph}}^s + \Delta\text{TGD}_j^s \\ &\quad + \Delta l_{r,j}^s + \Delta v_r^s + e_{r,j}^s \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $p_{r,j}^s$ 为接收机 r 测量卫星 s 的导航信号 j 所获得的伪距观测量, ρ_r^s 为星地几何距离, $dt_{r,j}^s$ 为接收机钟差, dt_j^s 为卫星钟差, TGD_j^s 为卫星设备时延差, $l_{r,j}^s$ 和 v_r^s 分别为电离层延迟和对流层延迟误差, $e_{r,j}^s$ 为未建模误差, $\bar{p}_r^s$ 、 $\bar{dt}_j^s$ 、 TGD_j^s 、 $r_{r,j}^s$ 和 $\bar{v}_r^s$ 分别为根据导航电文计算得到的模型改正值, Δ 表示经模型计算值改正后的残余误差项。

为评估试验星空间信号质量, 我们利用一款BDS-3试验终端, 于2017年3月3日至9日, 在北京地区监测了四颗试验卫星的B1I和B3I信号, 实验中采用公式(1)计算得到各试验卫星B1I和B3I信号的UERE, 并统计相应UERE的每日均值, 统计结果如表2所示。

从表2可以看出, BDS-3试验系统IGSO卫星日平均用户等效距离精度UERE优于MEO卫星, 分析原因可能为MEO卫星可观测时间较少, 且卫星观测时段中低高度角观测比例较大, 导致其UERE均值统计结果较差。

此外, 北斗卫星运控系统利用多频接收机和兼容型接收机监测了BDS-3试验星的授时精度, 相应结果列于表3。其中, 授时精度由从用户伪距观测方程中专

图 3 I2-S和M1-S卫星全球系统新信号的伪距多径时间序列及高度角时间序列

图 4 各试验卫星伪距多径RMS

门解算时间参数获得, 解算时用户坐标位于已知点, 卫星轨道、卫星钟差、电离层延迟和对流层延迟等参数均从导航电文中计算得到。

图 5 BDS-2和BDS-3 MEO卫星B1I和B3I信号伪距多径对比情况
C14为BDS-2 MEO卫星, M1-S为BDS-3 MEO卫星

表 2 BDS-3试验卫星等效距离误差UERE每日均值统计结果(m)

	I1-S		I2-S		M1-S		M2-S	
	B1I	B3I	B1I	B3I	B1I	B3I	B1I	B3I
3日	-0.82	-0.60	0.19	-0.12	0.93	1.14	1.63	1.51
4日	-0.55	-0.27	0.07	-0.17	0.26	0.33	1.21	0.98
5日	-1.04	-0.81	0.28	0.11	0.76	1.10	1.24	1.04
6日	-0.79	-0.51	0.09	-0.14	0.78	0.94	0.94	0.72
7日	-0.97	-0.71	0.01	-0.32	0.89	1.10	1.57	1.45
8日	-0.75	-0.51	0.25	-0.05	0.85	1.00	0.89	0.70
9日	-0.85	-0.67	0.39	0.08	1.12	1.35	-0.35	-0.65
平均	-0.82	-0.58	0.18	-0.09	0.80	0.99	1.02	0.82

从表3中可以看出, 不同终端、不同信号授时精度略有差异, 但是大多数信号时间精度好于10ns, 最差的授时精度为21.9ns。

4 北斗全球系统定位精度预测

我们以BDS-3试验星信号质量和BDS-3星座(3颗GEO、3颗IGSO和24颗MEO)为参照, 仿真计算BDS-3可能达到的定位精度和单频实时导航精度。BDS-3系统空间星座由3颗GEO卫星、3颗IGSO卫星和24颗MEO卫星组成(China Satellite Navigation Office, 2017a), 空间星座具体设置如下(China Satellite Navi-

图 6 BDS-2和BDS-3 IGSO卫星B1I和B3I信号伪距多径对比情况

C07为BDS-2 IGSO卫星, I2-S为BDS-3 IGSO卫星

图 7 BDS-2和BDS-3星座MEO和IGSO卫星B1I和B3I伪距多径RMS统计结果

C_i表示BDS-2的系列卫星, I和M表示BDS-3试验卫星

tion Office, 2013):

(1) GEO卫星轨道高度35786km, 分别定点于东经80°、110.5°和140°;

(2) IGSO卫星轨道高度为35786km, 轨道倾角为55°, 分布在三个轨道面内, 升交点赤经分别相差120°, 其中三颗卫星的星下点轨迹重合, 交叉点经度为东经118°;

(3) MEO卫星轨道高度为21528km, 轨道倾角55°, 相位从Walker 24/3/1星座中选择, 第一、二、三轨道

面升交点赤经分布为0°、120°、240°, 三个轨道面第一颗卫星升交点角距依次为0°、15°、30°.

由于北斗MEO卫星回归周期为7天13圈, 故仿真时长定为7天, 仿真步长设为300s, 经纬度间隔设为5°×2.5°. 高度截止角设为5°时, 仿真计算得到全球区域可见卫星数(NSAT)、PDOP、HDOP和VDOP值空间分布情况见图8~11.

从图8可知, BDS-3全球可见卫星数为6~13颗, 西经150°至东经10°、南北纬15°~55°之间区域可见卫星数最少为6颗, 东经70°~150°、南北纬75°之间区域可见卫星数在11颗以上, 且赤道地区可见卫星数最多达到13颗.

从图9可知, BDS-3全球PDOP值在1.3~2.7之间, 如果UERE为1m, BDS-3全球定位精度预计在1.3~2.7m.

从图10可知, BDS-3全球HDOP值在0.7~1.5之间, 如果UERE为1m, BDS-3全球水平定位精度预计在0.7~1.5m.

从图11可知, BDS-3全球VDOP值在1.1~2.4之间, 如果UERE为1m, BDS-3全球高程定位精度预计在1.1~2.4m.

当然, 中国境内的UERE的精度不足以表征BDS-3全球信号的质量.

表 3 授时精度(ns)^{a)}

Item		IIS	I2S	M1S	M2S
多频接收机	B1I	7.36	8.48	7.10	9.05
	B1C	—	9.66	4.50	10.27
	B2a	—	13.68	5.00	9.49
	B2b	—	6.18	5.37	7.61
	B2a+b	—	10.25	8.10	5.73
	B3I	12.59	7.41	6.23	7.13
兼容接收机	B1I	11.89	6.53	12.78	21.95
	B1C	—	4.98	7.80	21.71
	B2a	—	4.31	8.74	11.48

a) 此表格由运控系统赵金贤博士提供

图 8 可见卫星数空间分布情况

图 9 PDOP值空间分布情况

图 10 HDOP值空间分布情况

图 11 VDOP值空间分布情况

5 结论

本文介绍了BDS-3的频率设计和试验卫星基本载荷性能, 侧重从用户角度分析了BDS-3试验卫星导航信号的信噪比, 伪距测量精度, 伪距多径误差, 空间信号综合质量, 用户授时精度等, 最后依据试验卫星的信号性能对BDS-3全星座可能实现的性能做了简单预测. 相关结果表明:

(1) 在BDS-3试验卫星各导航信号中, B1C信号伪距测量精度最差, B2a+b信号伪距测量精度最高, Bs频点伪距测量精度较差, 但优于B1C频点.

(2) BDS-3伪距信号的多路径效应相比于BDS-2明显减弱, 基本没有显著随高度角变化的系统误差. 各导航信号中, B1C信号抗多径性能最差, B2a+b信号抗多径性能最优.

(3) 对于BDS-3试验卫星空间信号质量和授时精度, 其MEO卫星的用户等效距离精度UERE小于IGSO, 总体UERE优于0.73m. 大多数导航信号时间精度好于10ns, 最差的精度为21.9ns.

(4) 通过BDS-3星座仿真分析可知, BDS-3全球可见卫星数为6~13颗, 其全球PDOP值在1.3~2.7之间, HDOP值在0.7~1.5之间, VDOP值在1.1~2.4之间, 当UERE为1m时, 全球定位精度预计在1.3~2.7m, 水平定位精度预计在0.7~1.5m, 高程定位精度预计在1.1~2.4m.

需要指出的是, 随着后续试验卫星的长期运行和观测, 以及BDS-3组网卫星的发射与运行, BDS-3系统的性能将会得到更加全面的验证与分析.

致谢 本文的授时精度是运控系统提供的, 在此对北斗运控的同事表示衷心的感谢.

参考文献

- 陈金平, 胡小工, 唐成盼, 周善石, 郭睿, 潘军洋, 李冉, 朱陵凤. 2016. 北斗新一代试验卫星星钟及轨道精度初步分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 46: 119502
- 谷军霞, 王春芳, 宋之光. 2015. 北斗短报文通信信道性能测试与统计分析. 气象科技, 43: 458–463
- 李金龙, 杨元喜, 何海波, 徐君毅, 郭海荣. 2012. 函数极值法求解三频GNSS最优载波相位组合观测量. 测绘学报, 41: 797–803
- 彭汉兵, 杨元喜, 王刚, 何海波. 2016. 星蚀期北斗卫星轨道性能分析—SLR检核结果. 测绘学报, 45: 639–645

- 施闯, 赵齐乐, 李敏, 唐卫明, 胡志刚, 楼益栋, 章红平, 牛小骥, 刘经南. 2012. 北斗卫星导航系统的精密定轨与定位研究. 中国科学: 地球科学, 42: 854–861
- 谭述森. 2010. 卫星导航定位工程(第二版). 北京: 国防工业出版社
- 谭述森. 2017. 北斗系统创新发展与前景预测. 测绘学报, 46: 1284–1289
- 唐成盼, 胡小工, 周善石, 潘军洋, 郭睿, 胡光明, 朱陵凤, 李晓杰, 吴杉, 王琰. 2017. 利用星间双向测距数据进行北斗卫星集中式自主定轨的初步结果分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 47: 029501
- 杨元喜. 2010. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战. 测绘学报, 39: 1–6
- 杨元喜, 李金龙, 徐君毅, 汤静, 郭海荣, 何海波. 2011. 中国北斗卫星导航系统对全球PNT用户的贡献. 科学通报, 56: 1734–1740
- 杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 徐君毅, 何海波, 郭海荣, 申俊飞, 戴弦. 2014. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估. 中国科学: 地球科学, 44: 72–81
- 张小红, 丁乐乐. 2013. 北斗二代观测值质量分析及随机模型精化. 武汉大学学报(信息科学版), 38: 832–836
- de Bakker P F, van der Marel H, Tiberius C C J M. 2009. Geometry-free undifferenced, single and double differenced analysis of single frequency GPS, EGNOS and GIOVE-A/B measurements. *GPS Solut*, 13: 305–314
- China Satellite Navigation Office. 2013. BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 1.0)
- China Satellite Navigation Office. 2017a. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B1C and B2a (Test Version)
- China Satellite Navigation Office. 2017b. Update on BeiDou Navigation Satellite System, ICG-12, 3 December 2017, Kyoto, Japan
- Feng Y. 2008. GNSS three carrier ambiguity resolution using ionosphere-reduced virtual signals. *J Geod*, 82: 847–862
- Geng J, Bock Y. 2014. Erratum to: Triple-frequency GPS precise point positioning with rapid ambiguity resolution. *J Geod*, 88: 95–97
- Guo F, Li X, Zhang X, Wang J. 2016. Assessment of precise orbit and clock products for Galileo, BeiDou, and QZSS from IGS Multi-GNSS Experiment (MGEX). *GPS Solut*, 21: 279–290
- Han C, Yang Y, Cai Z. 2011. BeiDou Navigation Satellite System and its time scales. *Metrologia*, 48: S213–S218
- Han C H, Cai Z W, Lin Y T, Liu L, Xiao S H, Zhu L F, Wang X L. 2013. Time synchronization and performance of BeiDou satellite clocks in orbit. *Int J Navig Observat*, doi: 10.1155/2013/371450
- He H, Li J, Yang Y, Xu J, Guo H, Wang A. 2014. Performance assessment of single- and dual-frequency BeiDou/GPS single-epoch kinematic positioning. *GPS Solut*, 18: 393–403
- He L, Ge M, Wang J, Wickert J, Schuh H. 2013. Experimental study on

- the precise orbit determination of the BeiDou Navigation Satellite System. *Sensors*, 13: 2911–2928
- Li B F, Shen Y, Zhang X. 2013. Three frequency GNSS navigation prospect demonstrated with semi-simulated data. *Adv Space Res*, 51: 1175–1185
- Li B F, Li Z, Zhang Z T, Tan Y A. 2017. ERTK: Extra-wide-lane RTK of triple-frequency GNSS signals. *J Geod*, 1031–1047
- Li J L, Yang Y X, Xu J Y, He H B, Guo H R. 2013. GNSS multi-carrier fast partial ambiguity resolution strategy tested with real BDS/GPS dual- and triple-frequency observations. *GPS Solut*, 19: 5–13
- Li J L, Yang Y, He H, Guo H. 2017. An analytical study on the carrier-phase linear combinations for triple-frequency GNSS. *J Geod*, 91: 151–166
- Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. 2015. Broadcast versus precise ephemerides: A multi-GNSS perspective. *GPS Solut*, 19: 321–333
- Ren X, Yang Y, Zhu J, Xu T. 2017. Orbit determination of the Next-Generation Beidou satellites with Intersatellite link measurements and a priori orbit constraints. *Adv Space Res*, 60: 2155–2165
- Shi C, Zhao Q, Hu Z, Liu J. 2013. Precise relative positioning using real tracking data from COMPASS GEO and IGSO satellites. *GPS Solut*, 17: 103–119
- Wanninger L, Beer S. 2015. BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy. *GPS Solut*, 19: 639–648

(责任编辑: 杨顶辉)